사출 금형의 병렬 냉각 채널 설계 방법

김 현 수,[1] 정 휘 권,[2] 한 병 윤,[1] 김 영 만,[3] 박 형 구*[2]
[1]전남대학교 기계공학과, [2]전남대학교 기계시스템공학부
[3]전남대학교 신소재공학부

DESIGN OF PARALLEL COOLING CHANNELS IN A PLASTIC INJECTION MOLD

H.S. Kim,[1] H.K. Jung,[2] B.Y. Han,[1] Y.M. Kim[3] and H.K. Park*[2]
[1]Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam Nat'l Univ.
[2]School of Mechanical Systems Engineering, Chonnam Nat'l Univ.
[3]Dept. of Materials Science & Engineering Chonnam Nat'l Univ.

The injection molding process is suitable for manufacturing complicated plastic products. As the customer request higher quality products increase, realization of the precise dimensional and shape controls is getting more important. For this purpose it is important to obtain uniform cooling procedure over the whole surface of the high temperature molded plastic. Failure to this may lead to different shrinkage speed, internal stresses and unwanted shape deformations. It is necessary to distribute coolant flow rates to the main channel and to the sub-channels properly to insure uniform cooling process when there are parallel cooling channels. In this study, three-dimensional turbulent flow simulations for representative parallel cooling channels were performed. To insure the intended flow rate to each sub-channels, various shape designs for the channel system were investigated. The results show that as the Reynolds number increases the effect of shape design is more profound. Through the proper flow distribution, uniform cooling effects would be expected.

Key Words : 사출금형(injection mold), 냉각채널(cooling channels), 분기관(branch), 병렬 유동(parallel flow)

1. 서 론

사출 성형은 250℃전후 고온 상태의 수지를 금형 내부의 캐비티(cavity) 안으로 주입하여 냉각 후 제품을 얻는 성형 방법이다. 제품 내로 수지를 주입하는 충전(filling)단계와 수축에 의한 체적감소를 보상하기 위하여 지속적인 압력을 가해주는 보압(packing)단계, 고온의 수지를 냉각하여 충분한 기계적인 강성을 갖도록 하는 냉각(cooling) 단계, 금형이 열리고 제품이 나오는 취출(ejecting)단계로 이루어진다.

냉각 단계에서 고온의 수지는 수축 현상을 겪게 되며, 제품에 균일한 냉각이 이루어지지 않을 경우 국부적인 수축 차이로 변형이 발생하게 된다. 더불어 국부적인 고온부의 형성은 해당 부분의 고화 온도 이하로의 냉각을 위한 냉각 시간을 증가시킨다[1]. 제품의 변형을 감소시키기 위해서는 제품 전반에 대해 동일한 열유속(heat flux)을 제거하는 것이 바람직하다. 그러나 제품의 형상, 러너시스템의 게이트로부터 유동 거리 차이 등에 따라 제품 전반에 균일한 열유속 제거는 불가능하며, 금형 표면 온도를 균일하게 하여 최대한 제품의 변형이 감소하도록 하는 방법이 현실적이다. 따라서 금형 표면에 균일한 금형 표면 온도를 형성하는 냉각시스템의 설계는 중요하다.

병렬 냉각 채널은 대형 플라스틱 제품에 많이 쓰이며, 이에 대한 선행 연구들은 다음과 같다. 민병현[2]은 다구치 방법을 사용하여 각각 인자들의 영향을 조사하고 영향력 있는 인자를 냉각수량, 냉각채널과 캐비티 표면까지 거리, 냉각수 입구 온도, 냉각 채널 직경 순으로 나열하였다. 장형건[3]은

Received: June 7, 2012, Revised: August 16, 2012,
Accepted: August 17, 2012.
* Corresponding author, E-mail: park@chonnam.ac.kr
DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.3.093
Ⓒ KSCFE 2012

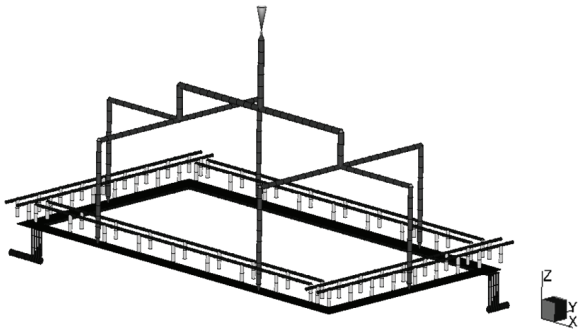

Fig. 1 3D modeling of TV front cover, runner system and cooling system

냉각관 간격, 냉각관 깊이를 설계변수로 선정하여 각 경우에 대하여 제품 표면의 평균온도를 추출하고 표준편차를 검사하여 최적화 설계를 수행하였다. 김진섭, 김성기, 조진현, 김상학[4]은 병렬 냉각 채널의 형상에 따른 압력 강하 및 온도 변화에 대한 연구를 수행하였다.

일단 제품의 두께 및 형상이 결정되었다면, 냉각 단계 종료 시점에서의 금형 표면의 온도 분포는 냉각 채널의 배열에 관련된 다음 변수의 조합으로 결정된다. 병렬 냉각 채널을 구성하는 경우 냉각 채널간 거리, 제품과 냉각 채널과의 거리를 적절히 조절하여 금형 표면의 온도 분포를 균일하게 유지하는 것이 중요하다. 냉각수량, 냉각수 입수 온도는 금형 제작이 완료된 이후 추가적인 장비를 이용하여 냉각 환경을 개선할 수 있으나, 금형 제작 시 함께 제작되는 냉각 채널은 한번 제작되면 조정하기 어렵다. 따라서 냉각 시스템을 설계 시 냉각 채널의 배열을 일차적으로 고려해야한다. 일반적으로 이러한 설계인자는 경험에 의해 결정되어 왔으나, 제품의 형상이 복잡해짐에 따라 냉각 시스템 설계 기준이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 병렬 냉각 채널을 설계할 때 냉각 채널의 직경, 냉각 채널간 거리, 냉각 채널과 제품 표면과의 거리를 설계변수로 선정하여 병렬 냉각 채널의 횡 방향 및 길이 방향에 대한 온도 분포, 표준 편차 등을 분석하였다.

2. 해석 모델 및 조건

2.1 사출 대상 및 사출 해석 조건

충진 단계 해석 종료 시 형성되는 제품의 온도 분포는 냉각 해석 초기 온도 조건이 되므로, 제품의 냉각 단계 이전에 충진 단계에 대한 해석이 필요하다.

냉각 병렬 냉각 채널을 적용한 해석 모델은 55인치 TV의 베젤이며, 가로 1370 mm, 세로 740 mm, 폭 50 mm, 두께 2 mm의 제원을 갖는다. Fig. 1은 1개의 스프루(sprue)와 6개의 게이트를 갖는 러너시스템과 제품의 형상을 보여준다. 충진 단계에서 스프루로부터 고온의 수지가 금형 내부에 가공된 공동부인 캐비티로 유입된다. 사출 조건은 Table 1과 같고, 사출 해석에 적용된 수지는 일반적으로 TV제품 및 생활 가전 사출 제품에 사용되는 ABS 수지이다.

사출 금형 내에서 용융플라스틱의 흐름은 유동 폭이나 유동길이에 비해 제품의 두께가 얇은 편이므로, 높이를 H, 폭을 B라 하였을 때 H<<B인 슬릿형 유로로 가정할 수 있다. 유로를 통하여 흐르는 유동의 흐름은 층류이며 입구의 압력손실을 무시하고 정상상태의 흐름이라고 가정하며, 속도와 압력구배에 관하여 식 (1)과 같이 표현되며, 식 (1)을 연속방정식에 대입한 후 z 방향으로 적분하였을 때 Hele-shaw 유동의 지배방정식인 식 (2)를 얻을 수 있다[5].

$$u = \nabla p \frac{z^2 - H}{2\mu} \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(S\frac{\partial p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(S\frac{\partial p}{\partial y}) = 0 \tag{2}$$

$$S = \int_{-b}^{b} \frac{z^2}{\eta} dz \tag{3}$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta\dot{\gamma}^2 \tag{4}$$

식 (2)에서 b는 z 방향 제품 두께의 1/2를 의미하며, η는 점성계수를 의미한다. 열전달은 Fourier 열전달 방정식으로 계산된다. 이와 같은 가정은 식 (3)으로 근사되며 $\dot{\gamma}$ 는 전단율을 의미하며, 우변의 마지막 항은 점성 소산에 의한 발열을 나타낸다. 점성 모델 중 온도에 따른 점도변화를 반영하는 Cross-WLF 모델을 사용하여 캐비티 내에서 수지의 금형과의 열전달에 의한 온도변화가 수지 점도에 영향을 주도록 계산하였다. 입구에서의 수지 유입은 사출 압력 조건을 따르며, 초기 캐비티 내부의 공기는 수지가 유입되면서 캐비티의 모든 벽면을 통해 빠져나가게 된다. 비정상 상태 사출 성형 해석을 통해, 반복적인 사출 성형에 따른 주기적인 정상상태에 이르렀을 때의 온도 분포를 결과로 얻을 수 있다.

2.2 냉각 채널 및 냉각 해석 조건

냉각 단계에서는 Fig. 1 제품 상부에 있는 배플(baffle)관과

Table 1 Injection molding conditions

cooling operating parameter	value
Filling time(s)	1.6
Mold surface temperature(℃)	60
Melt temperature(℃)	200

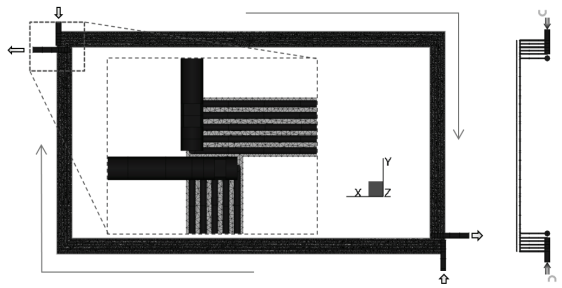

Fig. 2 Structure and mesh generation of the cooling channels

하부의 병렬 냉각채널에 의해 빠른 속도로 냉각이 진행된다. 상부의 배플 관은 러너시스템의 존재로 인해 공간적 제약 때문에 사용되는 냉각 구조이며, 줄 냉각관에 비해 냉각효율이 낮다[5]. 따라서 제품 냉각에 더 많은 영향을 미치는 제품 하부의 병렬 냉각 채널의 균일한 냉각의 중요성이 커진다.

Fig. 2는 병렬 냉각 채널의 구성으로 'ㄱ'형태의 병렬 냉각 채널은 좌측 상부 입구로부터 냉각수가 들어와 우측하단으로 출수된다. 대각선으로 대칭되게 'ㄴ'형태의 병렬 냉각 채널은 우측 하단으로부터 냉각수가 들어와 좌측 상단으로 나간다.

냉각수의 입수 온도는 25℃로 일정하며, 메인 채널로 유입되는 냉각수 유량은 15.24 lit/min이다.

초기 냉각수가 냉각 채널로 유입되는 메인 채널의 직경은 20 mm이며, 제품의 균일한 냉각을 위해 메인채널은 z 방향으로100 mm만큼 떨어져있다. 실질적으로 제품을 냉각하는 서브 채널의 직경은 10 mm이다.

설계 변수는 냉각 채널의 개수가 5개 일 때, 채널 직경 ***b***, 채널간 거리 ***c***, 채널 표면과 제품 표면과의 거리 ***d*** 를 선정하였으며, 냉각 채널 배열 해석을 위한 변수의 값들은 Table 2에 나타나 있다.

본 연구에서는 상용코드인 Moldflow 2010을 사용하였으며, 수치해석기법은 경계요소법(BEM)이 사용되었다. 수지의 유동을 해석하는 사출 성형 해석에서는 Tetra mesh가 사용되었으며, 러너 및 냉각 채널과 같이 관내유동의 경우 1차원으로 근사하는 것이 계산 비용을 줄이면서 계산에 대해 신뢰성 있는 결과를 보이므로, 1차원 Beam mesh를 사용하여 유체의 압력 및 속도를 계산하였다. 격자 개수는 약 85,000개이며, 냉각 채널의 변수를 고정하였을 때, 냉각해석에서 격자 개수 변화에 따른 온도 변화가 일어나지 않도록 격자를 생성하여 계산에 대한 신뢰성을 확보하였다.

3. 결과 및 고찰

냉각 채널은 균일하며, 빠른 냉각을 목표로 한다. 균일한 냉각을 위해 횡 방향과 길이 방향에 대하여 금형 표면의 온도 편차가 적은 것이 유리하다. 빠른 냉각을 위해선 목표했던 제품의 온도에 빨리 도달하도록 냉각 채널을 설계하는 것이 유리하다.

Fig. 3에 나타난 방향을 기준으로, 횡방향(transverse direction)으로는 금형 표면 온도의 표준 편차를 확인하였다.

길이 방향(longitudinal direction)으로 금형 표면 온도 변화를

Table 2 Cases for channel design

Case No.	Channel Diameter (mm): b	Distance between cooling channels (mm): c	Distance between product surface and center of cooling channels (mm): d
1	6	10	6
2			8
3			10
4			12
5		12	6
6			8
7			10
8			12
9		14	6
10			8
11			10
12			12
13	8	12	6
14			8
15			10
16			12
17		14	6
18			8
19			10
20			12
21		16	6
22			8
23			10
24			12
25	10	14	6
26			8
27			10
28			12
29		16	6
30			8
31			10
32			12
33		18	6
34			8
35			10
36			12

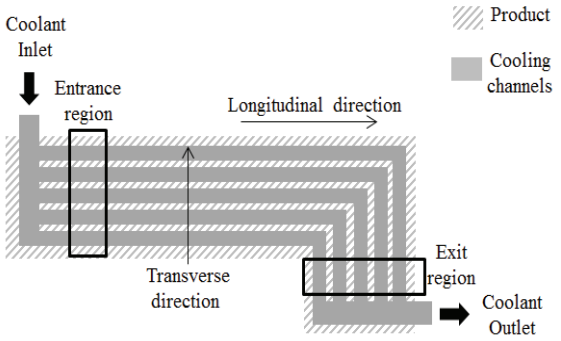

Fig. 3 Schematic shape of the cooling channels

측정하기 위해 입구영역(entrance region)과 출구영역(exit region)의 평균 온도 차이를 계산하였다. 식 (5)는 횡방향 온도 표준 편차에 대한 식으로 x_i 는 입구 영역과 출구영역에서의 element의 온도를 측정한 값이며, m은 입구 영역과 출구영역, 각 영역의 평균온도를 의미한다. n은 온도 측정 element의 개수를 의미 한다. 횡방향 온도 표준 편차는 각 영역에서 평균 온도에 대하여 온도 차이의 정도를 나타낸다.

$$\sigma = \sum \frac{\sqrt{(x_i - m)^2}}{n} \tag{5}$$

$$m_{diff} = m_{entrance} - m_{exit} \tag{6}$$

식 (6)은 길이방향 평균 온도 차이에 관한 식이다. 입구 영역의 평균 온도와 출구 영역의 평균 온도의 차이, m_{diff}를 나타내며 이 값이 작을수록 온도편차가 작아지며, 따라서 채널의 냉각 성능이 우수한 것으로 판단한다. 여기서 $m_{entrance}$는 입구 영역의 평균온도를, m_{exit}는 출구 영역의 평균 온도를 의미한다.

3.1 냉각 채널 횡 방향에 대한 온도 변화

횡방향 온도 편차의 경우 제품 폭 ***w*** 에 대한 냉각 채널의 설계가 중요함을 확인할 수 있다. 해석 결과 제품의 폭에 따라 냉각 채널 직경 ***b***, 냉각 채널간 거리 ***c***, 냉각 채널과 제품과의 거리 ***d*** 가 모두 영향을 받는 것을 확인하였다. 제품 폭 ***w*** 가 일정할 때, 변수 ***b***, ***c*** 의 증가에 따라 병렬 냉각 채널 가운데 제품 냉각에 영향을 주지 않는 냉각 채널이 발생하게 되며, 이에 따라 온도 편차가 더욱 커지는 경향을 확인 할 수 있다. 해석 결과를 분석하였을 때 온도 편차는 다음과 같은 무차원 변수 ***e*** 와 관련이 크다.

$$e = \{b + 4c\}/w \tag{7}$$

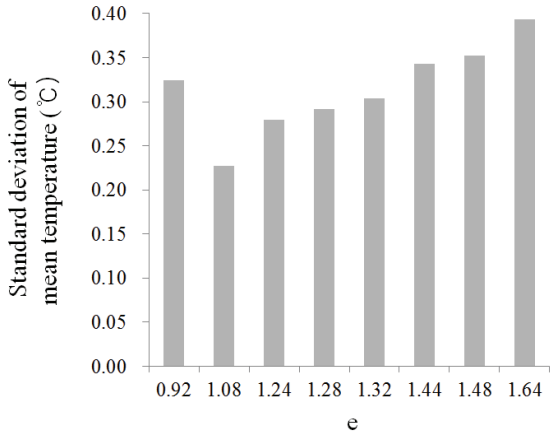

Fig. 4 Temperature deviation about e in transverse direction

식 (7)에서 ***b*** 와 ***c*** 는 앞서 언급한 변수의 값을 의미하여 $e = \{b + 4c\}$는 병렬 냉각 채널의 폭과 같다. 이를 제품의 폭으로 나누게 되면, 무차원수 ***e*** 값을 얻을 수 있다. 변수 ***b***, ***c*** 의 개별적인 값에 대한 고려 없이 ***e*** 값이 1에 가까울수록 온도 편차가 작아지는 것을 확인 할 수 있다. 특히 제품 폭 ***w*** 와의 관계에 따라 냉각 효과가 달라지는 것을 확인하였다.

Fig. 4는 ***e*** 값에 따른 온도 편차를 보여주고 있다. 냉각수 유동 압력을 견딜 수 있는 채널간 거리가 유지되어야하므로, 이에 따른 설계 가능 범위를 고려할 때 ***e*** 값이 1에 가장 가까운 냉각 채널 배열이 적합함을 알 수 있다. 따라서 냉각 채널 설계 시 실제 가공 가능한 최소 직경 ***b*** 를 선정하고, 내압에 저항 가능한 채널간 거리 ***c*** 를 선정하여 ***e*** 값이 1에 가깝도록 설계하는 것이 좋다.

냉각 채널의 직경, 채널간 거리, 채널 표면과 제품표면의 거리에 의해 횡 방향 온도 편차가 발생하게 되며, 특히 ***d*** 의 경우 제품 폭과 관계가 크며, 각 변수에 따른 구체적인 영향은 Fig. 5에 나타나 있다.

Fig. 5는 냉각 채널의 직경이 6 mm일 때 (Case 1~12), 채널간 거리가 커질 때, 제품 표면과 냉각 채널 중심과의 거리변화 ***d*** 에 의한 온도 편차 변화를 보여주고 있다. x 축은 냉각 채널간 거리를 나타내며, y 축은 평균 온도에 대한 표준 편차를 나타낸다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 채널간 거리 변화에 따라 제품 온도의 표준 편차가 달라진다. ***e*** 값이 1.08일 때 횡방향 온도 편차가 가장 줄어드는 것을 파악할 수 있으며, 동시에 제품 표면과 냉각 채널간 거리가 증가할 때 경향에 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있다.

먼저 ***e*** 값이 0.98로 1보다 작은 경우, 즉 ***c*** 가 10인 경우는 제품 표면과 냉각 채널간 거리가 커질 수록온도 편차가 작아지는 것을 확인 할 수 있다. 두 번째로 ***e*** 값이 1.08일 때, 즉

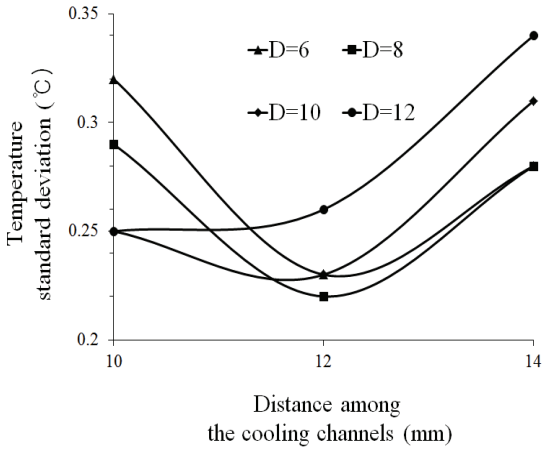

Fig. 5 Temperature deviation in transverse direction about distance between the cooling channels

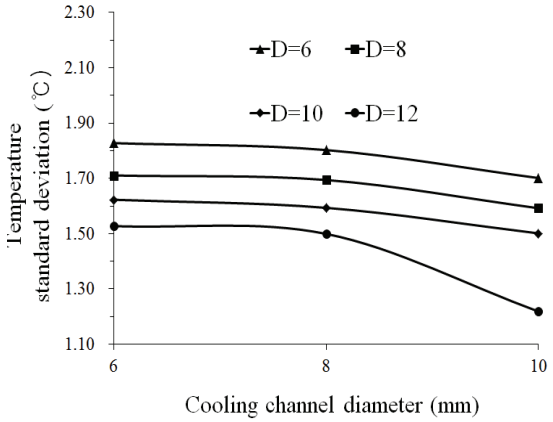

Fig. 6 Temperature deviation in longitudinal direction about distance between the cooling channels

e 값이 1보다 큰 경우 ***d*** 값이 8일 때 가장 낮은 횡방향 온도 편차를 보여주며, 감소하거나 증가할 때 오히려 좋지 않은 결과를 보인다. 즉, 채널간 거리가 작을 때는 냉각 채널의 직접적인 영향을 받는 부분과 받지 않은 부분의 온도 편차가 발생하며, 채널간 거리가 큰 경우 외곽에 존재하는 냉각 채널의 중심이 제품의 폭(50mm)을 넘게 되어 제품의 냉각에 미치는 영향이 작아짐을 확인할 수 있다. 제품의 횡 방향 온도차이가 작을 경우 변형 역시 작아짐을 예상할 수 있다. Case 1~36의 해석 결과에서 횡 방향 온도 편차는 최소 0.22℃부터 최대 0.47℃까지 발생하였다. 동일 직경 조건하에서 전체적으로 비슷한 경향을 보였으며, Case 6이 0.22℃로 가장 낮은 횡 방향 온도 편차를 보였다.

3.2 냉각 채널 길이 방향에 대한 온도 변화

각 설계 변수 값에 따라 입구 영역과 출구영역의 평균 온도 차이가 최소 1.22℃부터 최대 1.83℃까지 발생하였으며, 상대적으로 채널의 직경이 클 때, 채널간 거리가 클 때, 채널 중심과 제품 중심의 거리가 클 때 길이방향 온도차가 작게 발생하는 경향을 보였다.

Fig. 6는 채널 중심간 거리 ***c*** 가 14 mm로 일정할 때, 냉각 채널 직경 ***b*** 가 6 mm에서 10 mm로, 제품 표면과 채널 중심과의 거리 ***d*** 가 증가함에 따른 길이방향 온도 편차를 보여주고 있다(Case 9-12, Case 17-20, Case 25-28). 동일 채널거리를 갖는 경우 ***b*** 값이 증가함에 따라, ***d*** 값이 증가함에 따라 길이 방향으로 제품 평균온도에 대한 표준편차가 작아지는 경향을 확인 할 수 있었다. 이러한 온도 편차 변화의 이유로 해당 냉각 채널의 구성을 살펴볼 때, 냉각수가 입수되는 입구 영역에서(entrance region) 전열이 잘 되는 경우 출구 영역(exit region)에 진입하는 냉각수 온도가 상승하게 되어 입구 영역과 출구 영역에서 전열량 차이가 발생하는 것으로 볼 수 있다. 즉, 직경의 증가로 인해 ***e*** 값이 커지면서, 최외각의 냉각 채널들이 냉각에 영향을 주지 않게 되는 것을 생각해 볼 수 있다. 이에 따라 5개의 냉각 채널 중 3개의 냉각 채널 및 주위 금형으로의 열전달이 이루어진 결과 길이 방향으로의 온도 차이가 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 횡방향 온도 편차를 먼저 기준으로 하여 최소한의 길이 방향 평균 온도 차이가 발생하는 냉각 채널을 선정하는 것이 필요하다.

결과적으로 입수부 2개 출수부 2개를 갖는 구성으로는 길이 방향 온도 상승을 낮추는 것에 한계가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

1) 금형 표면에 균일한 온도 분포를 형성하기 위해서 냉각 채널의 적절한 배열이 필요하며 이 때 고려하여할 설계 변수로는 냉각 채널의 직경 ***b***, 냉각 채널간 거리 ***c***, 제품 표면과 냉각 채널간 거리 ***d*** 가 있으며, 제품의 폭 ***w*** 이 냉각 채널의 배열에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다.

2) 각 설계 변수와 제품의 폭과 관계는 무차원수 $e = \{b+4c\}/w$ 에 따라 차이를 보이는 것을 확인하였으며, ***e*** 값이 1에 가까운 냉각 채널 배열이 횡방향 온도 편차를 작게 하는 것을 알 수 있었다.

3) ***e*** <1인 경우 ***d*** 값이 증가하면 횡방향 온도 편차가 작아지는 경향을 보이나, ***e*** >1인 경우 ***d*** 값의 증가에 따라 온도 편차가 커지게 되며, 이러한 원인으로는 최외각 냉각 채널들의 영향이 작아지면서 온도 편차 변화 양상이 달라지는 것임을 확인하였다.

4) 입구 영역과 출구영역의 제품의 길이방향 평균 온도 차이는 ***e*** 값에 관계없이 ***d*** 값이 증가함에 따라 그 값이 작아짐을 확인하였다. 따라서 횡방향의 균일한 온도 편차를 먼저 고려한 이후, 최소한의 길이 방향 평균 온도 차이를 갖는 ***d*** 값의 선정이 필요하다.

5) 냉각 채널의 직경과 채널간 거리 추가, 입수부, 출수부 추가 설치를 통해 하여 길이방향 온도 편차를 줄이는 적합한 냉각 채널의 설계가 필요하다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 2006, Tang, S.H. Kong, Y.M. Sapunan, S.M Sulaiman, S. "Design and thermal analysis of plastic injection mould", *Journal of Materials Processing Technology,* Vol.171, pp.259-267.

[2] 2002 Min, B.H, "A Study on the Injection Molding Process using Nozzle and Cavity Pressure," *KSME*, Vol.10, pp.174-189.

[3] 2008 Jang H.G, "A study on automatic optimization of cooling circuit design in injection mold," *Master's Thesis*, AJOU Univ, Suwon.

[4] 2011 Kim J.S, Kim S.K, Jo J.H, Kim S.H, "Optimization of Heating and Cooling System for High Speed Injection Molding," *KSME*, Vol.5, pp.328-331.

[5] An Introduction to Dynamics by G. K. Batchelor at Cambridge Mathematical Library.

[6] 2008 Moon Y.B, "Development of rapid cooling system for injection moldm," *Master's Thesis*, Pukyoung Univ, Busan.